

Microwave Absorption Properties of Carbon-Coated Nickel Particle*

Zhenda Yang, Haiyan Zhang, Guoxun Zeng, Junjun Xu

Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou
Email: dashao281356@163.com

Received: Apr. 8th, 2013;; revised: May 3rd, 2013; accepted: May 12th, 2013

Copyright © 2013 Zhenda Yang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The carbon-coated nickel (C@Ni) was prepared by direct current arc method in argon atmosphere. The permittivity and permeability of carbon-coated nickel composite were practically tested in 1 - 18 GHz range using AV3618 machine. The impedance between carbon and nickel matched well as a result of the special structure of C@Ni, while the permeability showed that there were loss peaks within the frequency of 5 - 10 GHz and 13 GHz owing to the natural resonance. The maximum analog reflection losses of 2 mm thickness C@Ni composite layer can reach -30 dB at 13 GHz, while the reflection losses of C@Ni became -63 dB with both 3 mm thickness at 5.2 GHz and 4 mm thickness at 8.2 GHz. There was a good microwave absorption performance of carbon-coated nickel composite through analog computation, especially better microwave absorption performance within high microwave frequency.

Keywords: Arc Method; Carbon-Coated Nickel; Electromagnetic Parameters; Microwave Absorption

碳包覆镍纳米微粒的吸波性能研究*

杨振大, 张海燕, 曾国勋, 徐军军

广东工业大学材料与能源学院, 广州
Email: dashao281356@163.com

收稿日期: 2013年4月8日; 修回日期: 2013年5月3日; 录用日期: 2013年5月12日

摘要: 用直流碳弧法, 在氩气氛下烧制碳包覆镍纳米微粒。使用矢量网络分析仪 AV3618 测得碳包覆镍纳米微粒在 1~18 GHz 的电磁参数, 分析材料电磁性能。结果显示, 由于碳包覆镍纳米微粒的碳层与镍核的特殊结构, 使得阻抗匹配良好, 而测试的磁导率参数表明, 碳包覆镍纳米微粒复合材料在 5~10 GHz 和 13 GHz 存在损耗峰, 这可能是由纳米颗粒表面各向异性, 表面能的增加导致的自然共振引起的。模拟测试表明 2 mm 厚碳包覆镍纳米微粒复合材料在 13 GHz 时的微波吸收效果可以达到 -30 dB, 当厚度增加到 3 和 4 mm 厚时, 峰值增加到 -63 dB, 但是对应频段却向低频转移, 分别为 5.2 和 8.2 GHz。模拟计算显示, 碳包覆镍纳米微粒复合材料具有很好的微波吸收性能, 尤其对高频段微波具有更好的吸收性能。

关键词: 电弧法; 碳包覆镍纳米微粒; 电磁参数; 吸波性能

1. 引言

具有球状核壳结构的碳包覆纳米金属颗粒新形

*基金项目: 广东省自然科学基金(No.9251009001000006), 广东省科技计划项目(No. 2011B050300017, 2011A090200084)。

纳米碳材料, 它是由数层石墨片层紧密围绕核心形成有序排列, 其中金属处于粒子核心位置^[1]。碳包纳米材料具有独特结构, 这使得其具有电学、磁学、光学、力学等方面不一样的性能, 这些性能可开发应用于高

密度磁记录、电磁屏蔽、催化剂、生物医用、电池等方面^[2]。通过电弧法制备“壳/核”型碳包覆镍金属纳米颗粒，由于其壳层介电极化以及核与壳间的相互作用，会产生较大的介电损耗，以及在高频下产生自然共振现象，会产生磁损耗，理论可知会有良好的电磁波吸收性能^[3]。

材料的复介电常数(实部 ϵ' ，虚部 ϵ'')和复数磁导率(实部 μ' ，虚部 μ'')决定吸波材料电磁能的储能和消耗，是吸波涂层电磁特性的重要参数。实部与相对介电常数意义相同，代表储存能量的能力；虚部相当于在电容上并联一个等效电阻，其标志着电介质损耗能量的能力，而磁介质储藏的能量密度与复数磁导率的实部成正比。在实验涉及的频率下，趋肤深度应在微米数量级。提高铁磁金属颗粒的磁导率通常采用 2 种方法：1) 颗粒表面绝缘化，即在表层形成一层非导电层，将颗粒表层彼此隔离，将涡流限制在单个颗粒内，避免“宏观涡流”；2) 细化颗粒，当颗粒粒度小于电磁场的趋肤深度时，颗粒也能较好地传递外场，获得较高磁导率^[4]。

本文探索了碳包覆镍纳米微粒的微波吸收性能，是基于以下几点原因。第一碳包覆镍纳米微粒的 ϵ'' ($\epsilon'' = 0.87 - 0.27$) 比 CNT/Fe 的 ϵ'' ($\epsilon'' = 90 - 40$) 小得多，而碳包铁的 ϵ'' ($\epsilon'' = 50 - 45$)^[5]，这说明碳包覆镍纳米微粒纳米颗粒中的石墨层在提高纳米颗粒的分散性和磁耦合有着重要的作用。第二，由于石墨层与碳纳米管类似，由于它的介电性能与纳米颗粒电磁心有很好的协同效应，具有很好的微波吸收性能^[6]。最后软磁金属材料由于具有较高的斯诺依克的限制和量子尺寸效应，适合用来当作微波吸收剂^[7]。

本文研究的碳包覆镍纳米微粒通过在氩气氛里用直流电弧法制得。通过用传输线理论对微波频段的电磁参数测试并通过公式模拟碳包覆镍纳米微粒微波吸收性能，模拟计算显示，碳包覆镍纳米微粒复合材料有很好的微波吸收性能，尤其对高频段微波有更好的吸收性能。

2. 实验部分

将镍与石墨粉按质量 10:15 均匀混合压制成阳极棒，放在载物台上，用直流碳弧烧。阴极用纯石墨棒。反应室通入高纯氯气。He 气压约 2×10^4 Pa，电极距

离 3~4 mm。将合金粉末与预先融化的聚乙烯蜡按粉/蜡质量比 50:50 预混合。放在橡胶混炼机上混炼 10 min，得到碳包覆镍纳米微粒复合材料。将碳包覆镍纳米微粒复合材料模压制成环状试样(尺寸为 $\Phi 7$ mm \times $\Phi 3$ mm \times 3 mm)。在 AV3618 矢量网络分析仪上，利用传输反射法测试样品在 1~18 GHz 的电磁参数。用 X 射线衍射(XRD)表征材料成分，用扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)观察碳包覆镍纳米微粒。

3. 结果与讨论

3.1. 碳包覆镍纳米微粒的 XRD、SEM、TEM 分析

碳包覆镍纳米微粒的 X 射线衍射(XRD)结果如图 1 所示，对照 PDF#15-0806 卡片，我们发现碳包覆镍纳米微粒的 3 强衍射峰与镍的 3 强衍射($2\theta = 44.517^\circ$, 51.849° , 76.370°)相吻合，没有观察到镍的氧化物和碳化物出现；比起金属的衍射峰，非晶碳的衍射峰很弱。

图 2 是碳包覆镍纳米微粒的 SEM 形貌图。从图 2

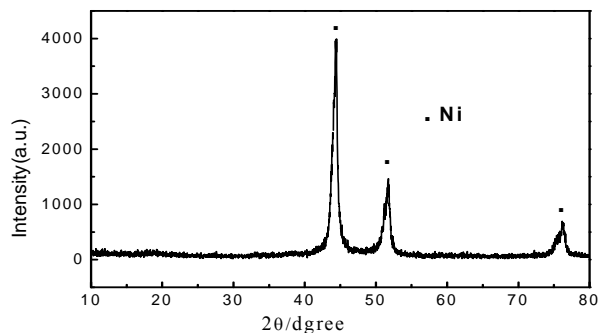


Figure 1. XRD patterns of C@Ni
图 1. 碳包覆镍纳米微粒的 XRD 图

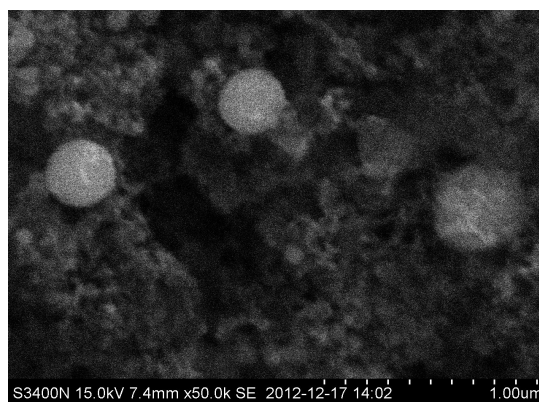


Figure 2. SEM images of C@Ni
图 2. 碳包覆镍纳米微粒的 SEM 形貌图

中可以看出材料团聚部分比较多,这是由于纳米材料颗粒表面各向异性,表面能增加,纳米颗粒不稳定,缺陷比较多造成碳包覆镍纳米微粒的团聚^[8]。

图3是碳包覆镍纳米微粒的TEM形貌图。从图中观察到,碳包镍纳米微粒呈核壳结构,以纳米镍磁性颗粒为内核,碳以一种石墨的碳层均匀包覆在镍纳米结晶表面。图3(a)说明碳包覆镍纳米微粒的粒径大约在10~50 nm范围内。图3(b)是局部的透射电镜高分辨图,碳包镍纳米微粒也是核壳结构,镍纳米晶是核心,表面包覆一层很薄的碳层,碳层厚约3 nm,镍纳米晶与碳层之间出现晶格条纹。这种碳包的核壳结构是保护金属镍的一种重要机制,使得镍可以保持金属的属性,不被氧化。X. F. Zhang^[9]发现碳包覆镍纳米微粒颗粒尺寸大概有20~30 nm,通过石墨的(002)晶界面可知道包在外层的碳包层大概有5~6 nm厚,与本文所测结果相似。

3.2. 混石蜡碳包覆镍纳米微粒电磁参数分析

图4是碳包覆镍纳米微粒的介电常数实部和虚部

(a)及磁导率实部虚部(b)谱图。从图4(a)中可以看出,样品的介电常数实部较小,在1~18 GHz频段,碳包覆镍纳米微粒介电常数实部在1 GHz处的4.2增加到4.5 GHz的4.5,然后在13 GHz处有一个最小的峰值3.2,增加到18 GHz处的3.7;而虚部则从0.27增加到13 GHz处的峰值0.95,之后在高频段回复到0.51。介电实部介电实部在5~10 GHz间有一个下降过程,相应介电虚部至少有两个损耗峰。从峰型判断应是弛豫型共振。样品在13 GHz附近也有一个弛豫型共振峰。但这些损耗峰值均不高。根据自由电子理论^[10] $\epsilon'' = 1/2\pi\epsilon_0\rho f$ 。其中 ρ 是电阻率。从公式可以推断,在1~18 GHz频段内,介电常数虚部越低,就有越高的电阻率,相对于其他的微波吸收材料来说,CNT/Fe的 $\epsilon''(\epsilon'' = 90 - 40)$,而碳包铁的 $\epsilon''(\epsilon'' = 50 - 45)$ ^[6],碳包覆镍纳米微粒具有较高的电阻率。高电阻率可能是因为碳包覆镍纳米微粒里存在点缺陷^[11],碳包覆镍纳米微粒在复合材料中分散均匀,同时纳米颗粒表层的石墨保护层^[6,7],导致碳包覆镍纳米微粒电阻率较高。我们相信,相比于石墨的电阻率($\rho = 7.5 \times 10^{-6} \Omega m$)^[12]只有3 nm

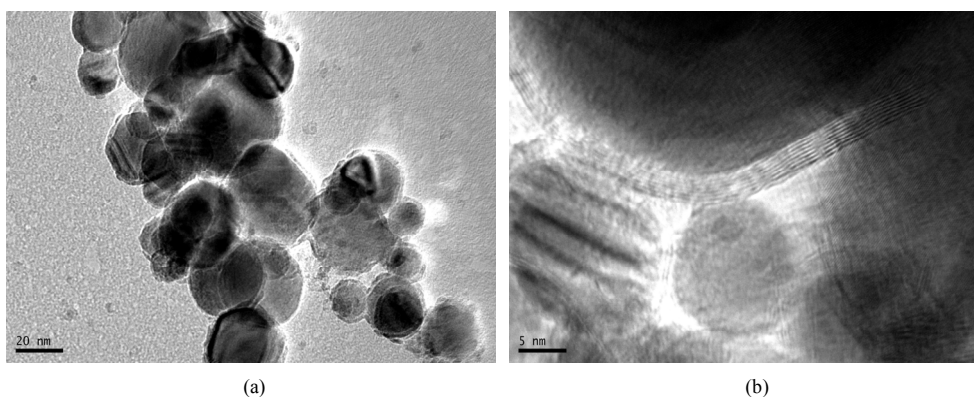


Figure 3. TEM images of C@Ni
图3. 碳包覆镍纳米微粒的TEM形貌图

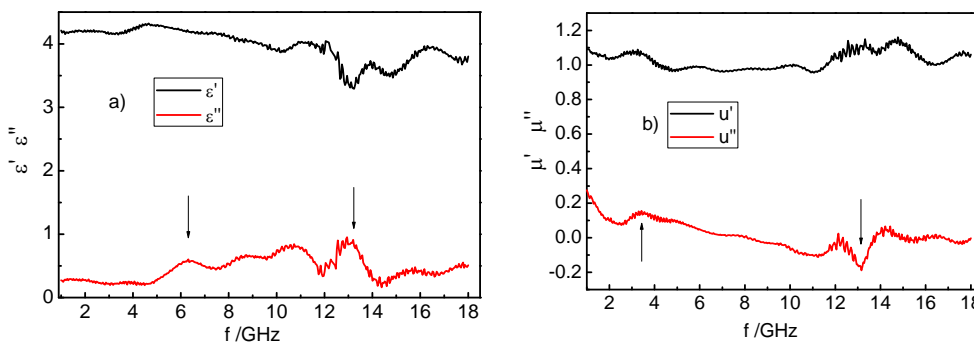


Figure 4. The real part (a) and the imaginary part (b) of permittivity and permeability curves plotted against frequency for C@Ni composites
图4. 碳包覆镍纳米微粒复合材料的介电常数实部和虚部(a), 磁导率实部和虚部(b)

厚的石墨表层的电磁性能在微波频段是不相同的。

尽管制得的碳包覆镍纳米微粒在 1~18 GHz 的介电实部很小,但是相对于 Fe/SmO, Fe/C(a)纳米复合材料^[7]来说,它的介电虚部是相当的大的,这说明和碳纳米复合材料相类似^[12],由于复合材料内的自由电子,使得它有不一样的介电损耗特性。随着频率的变化,碳包材料的核与外层之间的极化滞后从而导致介电损耗。总的来说,越高的电阻率和介电损耗对于材料微波吸收性能是有很大提高的。

图 4(b)是碳包覆镍纳米微粒磁导率样品的实部和虚部图,从图中可见样品磁导率实部也在 1.1~1.0 间。从图中可以看出,磁导率实部在 2~7 频段,突然从 1.26 下降到 0.93 然后在 7~18 GHz 频段保持一个平稳的值 (≈ 0.93)。值得一提的是磁导率的虚部最大值出现在 5.5 GHz,这说明了制备的碳包覆镍纳米微粒出现了自然共振现象。低频段有较弱的磁损耗。根据自然共振公式 $2\pi f_r = \gamma H_a$, 其中旋磁比 $\gamma = 2.8 \text{ GHz/kOe}$, $H_a = 4|K_1|/3\mu_0 M_s$, fcc 型的镍的各向异性系数 K_1 大约等于 $-5 \times 10^3 \text{ J/m}^3$, 自然共振频率大概发生在几十兆赫兹。小尺寸颗粒,特别是在纳米尺寸的颗粒的各向异性性能由于表面各向异性受小尺寸效应影响,自然共振的频率会大大的增加。碳包覆镍纳米微粒粒径小于 50 nm, 颗粒呈球形。颗粒表面存在大量的位错,缺陷,这些会成为偶极子极化中心,这些缺陷在电磁场作用下,形成偶极子转向极化,造成材料的弛豫损耗,当材料为纳米粒度时,磁性材料的矫顽力急剧升高,饱和磁感应强度大幅下降,导致材料的磁导率剧烈下降。也就是说,磁性碳包覆镍纳米微粒由于有相对高的有效各向异性性能(K_e)值,自然共振频率就可能转移到了更高的频段($\approx 13 \text{ GHz}$),这样使得材料作为电磁波吸收剂,在微波频段就显得有意义。

在磁损耗的三种机制中,引起磁滞的原因在于外部电磁场与磁化矢量的滞后,这种影响在弱磁场中可以忽略不计的。畴壁位移引起的磁损耗一般发生在多畴磁材料而不是单畴结构磁性材料,碳包覆镍纳米微粒的尺寸就比单畴磁材料理论计算的尺寸(55 nm)要小得多。正如前面所说的,所制得的碳包覆镍纳米微粒复合材料有很高的电阻率并且石墨层可以减小电磁涡流损耗。这样说导致碳包覆镍纳米微粒磁损耗的原因,可以排除比如磁滞,畴壁位移和涡流损耗。

由此可以解释,碳包覆镍纳米微粒的磁损耗是由于自然共振引起的,从而排除了磁滞畴壁位移和涡流损耗引起的磁损耗。事实上,碳包覆镍纳米微粒的石墨层也可以引起涡流损耗,但是自然共振起主导作用,相比起来可以忽略不计。

3.3. 混石蜡碳包覆镍纳米微粒介电损耗和磁滞损耗分析

介电损耗与磁损耗的正切结果如图 5。从图 5 可以看出:碳包覆镍纳米微粒的介电损耗正切很小,从约 0.05 开始,然后随着频率的提高数值迅速增加,中低频段介电损耗迅速增加到 0.20,在 5~12 GHz 间出现几个小峰,而最大峰值出现在约 13 GHz 处,损耗值达到 0.275,14 GHz 之后介电损耗回到 0.05,在高频段保持稳定。吸波体用的介电材料必须满足两种功能,既为电的传输提供通道,又要满足阻抗匹配功能。要满足这两种功能,介电材料的电阻率要尽可能地大,容易使人想到绝缘材料。在满足上述功能的前提下,如果同时具备吸收功能,那将是人们追求的目标。然而,阻抗与吸收功能常常是相互矛盾的^[13]。一般介电材料损耗大时,电阻率变化范围大约在 $10^6 \sim 10^{20} \Omega \cdot \text{m}$ 。电阻率变化范围是与满足不同频宽相联系的。隐形材料和暗室用吸波材料所要求的频宽越来越大,一种材料很难满足宽频高效的要求,一般优良的吸波体总是由多种材料复合而成。介电损耗材料,一般大于 10^{-2} ,并非越大越好,较大的损耗会引起反射加大,限制了其频宽。在吸波体中,是介电材料而不是吸波剂起着调节阻抗匹配的主导作用^[10]。磁损耗方面,刚好和介电损耗相反,磁损耗从 0.1 开始骤降,在 12~15

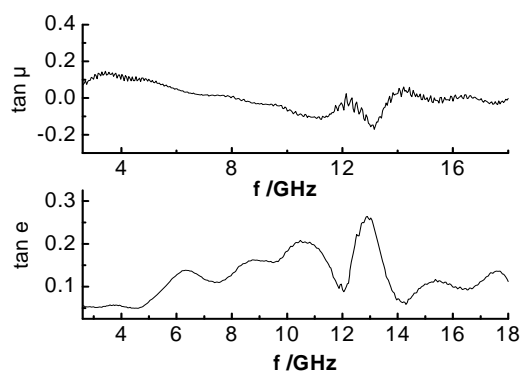


Figure 5. Curves of dielectric and magnetic loss angle tangent of C@Ni
图 5. 碳包覆镍纳米微粒的介电损耗和磁损耗

Ghz 频段出现最大损耗峰, 在高频段恢复到 0.1 并保持稳定, 这是由于自然共振致使磁损耗出现骤降。颗粒表面大量的位错、缺陷成为偶极子极化中心, 这些缺陷在电磁场作用下, 形成偶极子转向极化, 造成材料的弛豫损耗, 而材料颗粒是纳米级, 磁性材料的矫顽力急剧升高, 饱和磁感应强度大幅下降, 导致材料的磁导率剧烈下降, 磁损耗增加。也就是说, 碳包覆镍纳米微粒由于有相对高的有效各向异性性能(K_c)值, 自然共振频率就可能转移到了更高的频段(≈ 13 GHz)。

从上可以知道, 由于复合材料内的自由电子, 使得它有不一样的介电损耗特性。随着频率的变化, 碳包材料的核与外层之间的极化滞后从而导致介电损耗, 介电正切的变化是由于碳包覆镍纳米微粒外层石墨层与镍核之间的匹配而引起的。由于自然共振引起的碳包覆镍纳米微粒的磁损耗, 是材料吸收微波的一个重要原因。

3.4. 碳包覆镍纳米微粒模拟反射率

采用 AV3618 所测得的电磁参数, 通过材料反射率计算机模拟程序, 模拟了理想状态下, 单层吸波材料的吸波性能。模拟公式如下:

$$R = 201 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (1)$$

$$Z_{in} = Z_c \tanh[\gamma d] \quad (2)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (3)$$

$$\gamma = c\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r \mu_r} \quad (4)$$

$$Z_0 = (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2} \quad (5)$$

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (6)$$

$$\mu_r = \mu / \mu_0 = \mu' - j\mu'' \quad (7)$$

(1)~(7)公式中, c 为光速, ω 为角频率, ϵ_0 、 μ_0 为真空介电常数和磁导率, ϵ_r 、 μ_r 为吸波材料的相对介电常数和磁导率, 其中介电常数实部 ϵ' , 虚部 ϵ'' 和磁导率实部 μ' 虚部 μ'' , Z_{in} 为特性阻抗, γ 为传输常数, d 为样品厚度, ϵ_0 为自由空间的介电常数, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m; μ_0 为自由空间的磁导; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

总的来说, 要达到很好的电磁波吸收效果, 相对介电常数和相对磁导率的匹配是很重要的。如果只是

电磁损耗或单一的介电损耗只能产生很小的电磁吸收效果, 这是因为电磁不匹配。在碳包覆镍纳米微粒中, 由于石墨层的存在和它特有的核壳结构, 电磁匹配得很好。为了进一步证明由于吸波材料的这种结构引起的匹配性能, 根据传输线理论, 用测得的电磁参数模拟计算出碳包覆镍纳米微粒的反射率, 如图 6 所示。从图 6 可见, 当碳包覆镍纳米微粒复合材料厚度为 2 mm 时, 材料反射率曲线在 12.5 GHz 有一反射率峰, 约 -30 dB, 与 X. F. Zhang^[10]所模拟的碳包碳包覆镍纳米微粒复合材料相比吸收效果差不多, 但是反射率低于 -10 dB 的频带宽从 10 到 18 GHz, 频带更宽。另外随着厚度的增加, 峰值明显向低频段转移, 从 10~18 GHz, 样品反射率低于 -10 dB, 低于 -10 dB 的带宽有 8 GHz。当碳包覆镍纳米微粒复合材料厚度为 3 mm 时, 反射率曲线最低点在约 8 GHz, 峰值约 -65 dB, 低于 -10 dB 的带宽从 5.5~11 GHz, 约有 5.5 GHz。当碳包覆镍纳米微粒复合材料厚度为 4 mm 时, 反射率曲线最低点在约 5.5 GHz, 峰值约 -65 dB, 低于 -10 dB 的带宽从约 4~9 GHz, 约有 5 GHz。碳包覆镍纳米微粒的核/壳结构(石墨层外壳和铁磁性镍核)是产生这一现象的主要原因。这种结构使得材料形成均匀分散的矩阵纳米粒子影响了材料的电磁性能, 减少了纳米颗粒之间的电磁耦合效应, 增加了纳米颗粒之间的有效表面各向异性性能, 使得纳米几何尺寸电磁匹配。从上可知, 碳包覆镍纳米微粒材料有较好的微波吸收性能。尤其是高频段, 有较宽的吸波频宽。

4. 结论

- 1) 通过电弧法制备出碳包覆镍纳米微粒, 用同轴

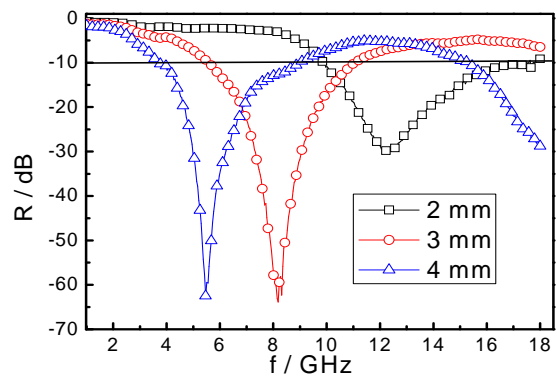


Figure 6. Curves of reflection loss of C@Ni with different thickness
图 6. 不同厚度碳包覆镍纳米微粒复合材料的模拟微波反射率曲线

法测试样品在 1~18 GHz 频率范围电磁参数。结果表明, 在 5~13 GHz 至少出现 3 个介电损耗峰, 其中最大峰值出现在 13 GHz, 这是碳包覆镍纳米微粒石墨层与镍核介电匹配的结果; 分析磁导率虚部表明, 碳包覆镍纳米微粒在低频段有较弱的磁损耗, 出现了自然共振现象。由于纳米尺寸效应、表面各向异性, 使得表面能增加, 位错、表面缺陷等使得偶极子极化, 造成弛豫损耗, 使得共振频率比理论值大很多, 向微波频段(13 GHz)转移。

2) 通过电磁参数模拟碳包覆镍纳米微粒吸波性能显示, 当碳包覆镍复合材料厚度为 2 mm 时, 在 12.5 GHz 最大吸收值约-30 dB, 反射率低于-10 dB 从 10 到 18 GHz, 有 8 GHz 带宽。随着厚度的增加, 峰值向低频段转移。3 mm 碳包覆镍复合材料, 反射率曲线在 8 GHz, 峰值约-65 dB, 低于-10 dB 的带宽从 5.5~11 GHz, 约有 5.5 GHz 带宽。4 mm 反射率曲线在 5.5 GHz, 峰值约-65 dB, 低于-10 dB 的带宽从约 5 GHz。微波反射率计算显示, 碳包覆镍纳米微粒材料对微波有较好吸收能力, 尤其对高频段的微波, 具有更好的吸收性能。

参考文献 (References)

[1] 连文涛, 商红岩, 曹月斌等. 中间相沥青基碳包覆镍纳米颗粒的制备及其催化性能[A]. 第八届全国新型碳材料学术研讨会论文集[C]. 山西: 科学出版社, 2007: 292-296.

[2] 黄涛, 黄英, 贺金瑞等. 吸波材料研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003, 1: 37-40.

[3] S. A. Awadalla. Magnetic study of nickel particles encapsulated carbon nanoparticles. San Jose State University, 1996.

[4] 曾国勋, 张海燕, 葛鹰等. FeCoNi 合金超细粉体的制备及其微波性能研究[J]. 表面技术, 2010, 39(3): 1-5.

[5] R. C. Che, L. M. Peng, X. F. Duan, Q. Chen and X. L. Liang. Microwave absorption enhancement and complex permittivity and permeability of Fe encapsulated within carbon nanotubes. *Advanced Materials*, 2004, 16(5): 401-405.

[6] J. R. Liu, M. Itoh, T. Horikawa, K. Machida, S. Sugimoto and T. Maeda. Gigahertz range electromagnetic wave absorbers made of amorphous-carbon-based magnetic nanocomposites. *Applied Physics*, 2005, 98(5): Article ID: 054305.

[7] L. L. Diandra, D. R. Reuben. Magnetic properties of nanostructured materials. *Chemistry of Materials*, 1996, 8(8): 1770-1783.

[8] X. L. Dong, Z. D. Zhang, S. R. Jin, W. M. Sun and Y. C. Chuang. Surface characteristic of ultrafine Ni particles. *Nanostructured Materials*, 1998, 10: 585.

[9] X. F. Zhang, X. L. Dong, H. Huang, Y. Y. Liu, W. N. Wang, X. G. Zhu, B. Lv, J. P. Lei and C. G. Lee. Microwave absorption properties of the carbon-coated nickel nanocapsules. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(5): Article ID: 053115.

[10] S. Ramo, J. R. Whinnery and T. V. Duzer. *Fields and waves in communication electronics*. New York: Wiley, 1984.

[11] P. C. P. Watts, D. R. Ponnampalam, W. K. Hsu, A. Barnes and B. Chambers. The complex permittivity of multi-walled carbon-nanotube-polystyrene composite films in X-band. *Chemical Physics Letters*, 2003, 378(5-6): 609-614.

[12] X. C. Luo, D. D. L. Chung. Flexible graphite under repeated compression studied by electrical resistance measurements. *Carbon*, 2001, 39(7): 985-990.

[13] 刘顺华, 刘军民, 董星龙等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.